

JP 2018-107404 A 2018.7.5

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-107404

(P2018-107404A)

(43) 公開日 平成30年7月5日(2018.7.5)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)	
<b>H01S</b>	<b>3/30</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>H01S</b>	<b>3/30</b>	<b>A</b>	<b>2G085</b>	
<b>H05H</b>	<b>13/04</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>H05H</b>	<b>13/04</b>	<b>F</b>	<b>5F172</b>	
<b>G21K</b>	<b>1/00</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>G21K</b>	<b>1/00</b>	<b>E</b>		
<b>G21K</b>	<b>5/02</b>	<b>(2006.01)</b>	<b>G21K</b>	<b>5/02</b>	<b>X</b>		

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2016-255707 (P2016-255707)  
 (22) 出願日 平成28年12月28日 (2016.12.28)

(71) 出願人 301032942  
 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構  
 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号  
 (74) 代理人 100097113  
 弁理士 堀 城之  
 (74) 代理人 100162363  
 弁理士 前島 幸彦  
 (72) 発明者 羽島 良一  
 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内

最終頁に続く

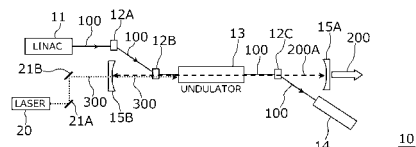
(54) 【発明の名称】 自由電子レーザー装置

(57) 【要約】

【課題】自由電子レーザー光のCEPを安定化する。

【解決手段】この自由電子レーザー装置10においては、レーザー光(シードレーザー光300)を発するシードレーザー光発振器20が用いられ、シードレーザー光300は、電子線100及び共振器ミラー15A・15B間の放射光200Aの光路に入射する。シードレーザー光300は発振されるレーザー光200と同一の波長をもち、最終的にレーザー光200となる放射光200Aに重畳される。このシードレーザー光300がレーザー発振のシードとして支配的になる。

【選択図】図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

加速器で高エネルギー化された電子又は陽電子の一群であり一方向に沿って一方から他方に向けて進行する電子パンチを前記一方向の周りで蛇行させることによって放射光を発するアンジュレータと、

前記一方向において前記アンジュレータよりも前記他方の側に設けられ前記放射光を前記一方の側に反射させる第 1 の共振器ミラーと、

前記一方向において前記アンジュレータよりも前記一方の側に設けられ前記第 1 の共振器ミラーで反射された前記放射光を前記他方の側に反射させる第 2 の共振器ミラーと、

を具備し、

前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーの間において前記放射光を閉じ込めて増幅することによって生成される自由電子レーザー光を発振する自由電子レーザー装置であって、

前記電子パンチと同期して前記一方向に沿って前記一方の側から前記アンジュレータに入射し前記放射光が前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーとの間で増幅されて前記自由電子レーザー光が生成される際のシードとなるレーザー光であるシードレーザー光を発するシードレーザー光発振器を具備することを特徴とする自由電子レーザー装置。

## 【請求項 2】

前記加速器において前記電子パンチは周期的に形成され、

前記放射光が前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーとの間を通過する時間が、前記電子パンチの繰り返し周期の半分の整数倍、又は前記電子パンチの繰り返し周期の半分の整数分の一に一致する構成とされたことを特徴とする請求項 1 に記載の自由電子レーザー装置。

## 【請求項 3】

前記自由電子レーザー光と前記シードレーザー光の波長が等しくされたことを特徴とする請求項 2 に記載の自由電子レーザー装置。

## 【請求項 4】

前記シードレーザー光は周期的に発振するパルス状とされ、

前記電子パンチの繰り返し周期が前記シードレーザー光の発振周期の整数倍、又は整数分の一に一致する構成とされたことを特徴とする請求項 3 に記載の自由電子レーザー装置。

## 【請求項 5】

前記シードレーザー光は連続的に発振する連続波とされ、

前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーの間隔が、前記シードレーザー光の波長の半分の整数倍とされたことを特徴とする請求項 3 に記載の自由電子レーザー装置。

## 【請求項 6】

前記シードレーザー光として、異なる波長をもつ 2 種類のレーザー光が用いられ、当該 2 種類のレーザー光の波長の逆数の差又は和が前記自由電子レーザー光の波長の逆数と等しくされたことを特徴とする請求項 2 に記載の自由電子レーザー装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、高エネルギー電子からの輻射を用いてレーザー光を発振する自由電子レーザー装置の構造に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

媒質によって発振する光の波長が定まる固体レーザーとは異なり、光の波長が可変である自由電子レーザーが知られている。自由電子レーザーにおいては、加速器によって MeV 以上のエネルギーに加速された高エネルギー電子（又は陽電子）を周期的な磁界が形成

10

20

30

40

50

されたアンジュレータに通過させ、この際に蛇行した電子が発する放射光が用いられる。この際、固体レーザーでは、固体を構成する原子中の束縛電子による光の吸収・放出過程における誘導放出がレーザー発振に利用されるのに対して、自由電子レーザーにおいては、アンジュレータ中の高エネルギー電子と光の相互作用がレーザー発振に用いられる。このため、自由電子レーザー装置においては、アンジュレータをその内部に含むように光共振器が設けられる。

#### 【0003】

この際、アンジュレータを通過する高エネルギー電子は、例えば線型加速器（リニアック）を用いて得られ、この線型加速器がアンジュレータの前段に接続される。線型加速器においては、高エネルギーの電子は長さ方向において狭い領域に集中した電子群であるバンチ（電子バンチ）となって周期的に繰り返し生成される。特許文献1や非特許文献1には、このバンチの繰り返し周期と、光が光共振器内を往復する周期とを、発振されるレーザー光の波長の $1/100$ 以下の高精度で同期させることによって、短い時間（数十fs程度）内にエネルギーを集中させた超短パルスレーザー光を発振させることができることが記載されている。この超短パルスレーザー光の発振タイミングは正確に制御できるためこの超短パルスレーザー光は、各種の超高速現象の観測、化学反応の観測、制御、各種の物性や半導体デバイスの研究等に極めて有用である。更に、自由電子レーザーにおいては、その波長を目的に応じて最適化することができるため、特にその使用用途は広い。

#### 【0004】

例えば、超短パルスレーザー光をターゲットガスに照射することによって、高次高調波（HHG）によるX線が発生させることができる。この際、入射させる超短パルスレーザー光の位相と発生するX線の位相をターゲットガス中で整合させることが必要であり、この際には超短パルスレーザー光の波長が長い方が有利であるため、近赤外～中赤外域の超短パルスレーザー光が特に有効である。この付近の波長域における高強度のレーザーとして、自由電子レーザーは特に有効であるため、この波長域の超短パルスレーザー光を自由電子レーザーによって発生させる装置（自由電子レーザー装置）が開発されている。

#### 【0005】

このような超短パルスレーザー光は、連続波である搬送波が、持続時間の短いパルス波によって振幅変調されたものと考えることができる。この際の変調波となるパルス波は、短い時間範囲でのみ出力が得られるようなガウス分布の形状となる。こうした場合における超短パルスレーザー光の電界強度の2つの例を図6（a）（b）に示す。ここで、パルスの持続時間は10波長分以下となっており、これらの特性における包絡線が前記の変調波となるパルス波の波形に対応する。

#### 【0006】

ここで、パルスの持続期間内における光の位相（キャリアエンベロープ位相：CEP）として、パルスのピーク時を基準とした電界強度が最大となる時点までの光の位相を定義した場合、図6（a）の場合に $\phi = 0$ 、図6（b）の場合に $\phi = \pi/2$ となる。図6（a）と図6（b）の場合には、同一波長のレーザー光が同一形状のパルス波で変調されているものの、単一のパルス持続期間中における電界強度プロファイルは大きく異なる。実際には図6に示された超短パルスレーザー光は、繰り返し発振され、発振されるパルス毎に $\phi$ が変動する、すなわち、CEPが安定しない場合がある。

#### 【0007】

こうした超短パルスレーザー光は光周波数コムとして各種の実験、計測に使用される場合が多く、光周波数コムを安定化するためには、CEPを安定化させることが必要である。また、超短パルスレーザー光を上記のようなHHGによるX線発生に用いる場合には、HHGの発生機構であるガス原子のトンネル電離の大きさがCEPに依存するため、CEPの安定化は特に重要になる。こうした状況は、図6においてパルスの持続期間内に含まれるサイクル数が少なくなる場合、すなわち、パルス長が短い場合に特に顕著となる。

#### 【0008】

CEPの安定化のための方策は、固体レーザーにおいては、例えば、特許文献2等に記

10

20

30

40

50

載されている。ここでは、固体レーザー装置から発振された超短パルスレーザー（モード同期レーザー）光をフォトニック結晶ファイバに集光して白色光を生成し、この白色光における長波長成分を非線形光学結晶に通過させることによって、二次高調波を生成する。この二次高調波と、元の白色光におけるこれと同じ波長の短波長成分との干渉信号から、CEPあるいはその変化を認識することができ、モード同期のための光共振器中の非線形分散量を制御し、CEPを安定化できる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献1】特開2003-17788号公報

10

【特許文献2】特開2009-116242号公報

【0010】

【非特許文献1】「Generation of a Self-Chirped Few-Cycle Optical Pulse in a FEL Oscillator」、Ryoichi Hajima and Ryoji Nagai、Physical Review Letters、91巻、24801頁（2003年）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

固体レーザーが用いられる特許文献2等に記載の技術においては、光共振器内において用いられた光学要素に対する何らかの制御を行うことによって、発振されるレーザー光の位相を調整し、CEPを安定化していた。一方、特許文献1、非特許文献1に記載のような自由電子レーザー装置では、アンジュレータにおいて磁場中の個々の電子が発する放射光によってレーザー光が生成され、放射光は、固体レーザーとは異なり、その発振時には時間的にコヒーレントではない。更に、ここで発せられる放射光は電子バンチ中に含まれる全ての電子が発した放射光の重ね合わせであり、バンチ内において各電子の位置や運動量等には分布が存在するため、発振するレーザー光の波長における光の位相をアンジュレータにおいて制御することは極めて困難である。このため、自由電子レーザー装置において、固体レーザーを用いた場合と同様にCEPを安定化することは実現できておらず、超短パルスレーザー光を出力することができる特許文献1、非特許文献1に記載の自由電子レーザー装置においても、その出力光においてCEPを安定化することはできなかった。

20

30

【0012】

このため、自由電子レーザー光のCEPを安定化することが求められた。

【0013】

本発明は、かかる問題点に鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

40

本発明の自由電子レーザー装置は、加速器で高エネルギー化された電子又は陽電子の一群であり一方向に沿って一方から他方に向けて進行する電子バンチを前記一方向の周りで蛇行させることによって放射光を発するアンジュレータと、前記一方向において前記アンジュレータよりも前記他方の側に設けられ前記放射光を前記一方の側に反射させる第1の共振器ミラーと、前記一方向において前記アンジュレータよりも前記一方の側に設けられ前記第1の共振器ミラーで反射された前記放射光を前記他方の側に反射させる第2の共振器ミラーと、を具備し、前記第1の共振器ミラーと前記第2の共振器ミラーの間において前記放射光を閉じ込めて増幅することによって生成される自由電子レーザー光を発振する自由電子レーザー装置であって、前記電子バンチと同期して前記一方向に沿って前記一方の側から前記アンジュレータに入射し前記放射光が前記第1の共振器ミラーと前記第2の

50

共振器ミラーとの間で増幅されて前記自由電子レーザー光が生成される際のシードとなるレーザー光であるシードレーザー光を発するシードレーザー光発振器を具備することを特徴とする。

本発明の自由電子レーザー装置は、前記加速器において前記電子バンチは周期的に形成され、前記放射光が前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーとの間を通過する時間が、前記電子バンチの繰り返し周期の半分の整数倍、又は前記電子バンチの繰り返し周期の半分の整数分の一に一致する構成とされたことを特徴とする。

本発明の自由電子レーザー装置は、前記自由電子レーザー光と前記シードレーザー光の波長が等しくされたことを特徴とする。

本発明の自由電子レーザー装置において、前記シードレーザー光は周期的に発振するパルス状とされ、前記電子バンチの繰り返し周期が前記シードレーザー光の発振周期の整数倍、又は整数分の一に一致する構成とされたことを特徴とする。

本発明の自由電子レーザー装置において、前記シードレーザー光は連続的に発振する連続波とされ、前記第 1 の共振器ミラーと前記第 2 の共振器ミラーの間隔が、前記シードレーザー光の波長の半分の整数倍とされたことを特徴とする。

本発明の自由電子レーザー装置は、前記シードレーザー光として、異なる波長をもつ 2 種類のレーザー光が用いられ、当該 2 種類のレーザー光の波長の逆数の差又は和が前記自由電子レーザー光の波長の逆数と等しくされたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0015】

本発明は以上のように構成されているので、自由電子レーザー光の C E P を安定化することができる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図 1】本発明の実施の形態に係る自由電子レーザー装置の構成を示す図である。

【図 2】本発明の実施の形態に係る自由電子レーザー装置において、アンジュレータを電子バンチが通過する際の、電子バンチと、放射光からなる光パルスの進行の状況を模式的に示す図である。

【図 3】超短パルス光となる自由電子レーザー光のパルス波形を、縦軸をリニア表示、横軸を進行方向座標（単位：波長）として算出した例である。

【図 4】超短パルス光となる自由電子レーザー光のパルス波形を、縦軸を対数表示、横軸を進行方向座標（単位：波長）として算出した例である。

【図 5】シードレーザー光を用いない場合、シードレーザー光の強度を 2 種類とした場合において生成される自由電子レーザー光の、光共振器内での往復回数と C E P との関係のシミュレーション結果である。

【図 6】異なる C E P をもつ 2 つの超短パルスレーザー光における電界強度の時間変化を示す例である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の実施の形態に係る自由電子レーザー装置について説明する。図 1 は、自由電子レーザー装置 10 の構成を示す図である。図 1 において、線形加速器（加速器）11 によって、電子が MeV 程度以上のエネルギーまで加速された電子線 100 が生成される。線形加速器 11 においては、高周波加速空洞で電子が加速され、後述するように、電子線 100 において、実際には電子は一樣なエネルギーをもち進行方向においてある一定の長さをもつ一群となったバンチ（電子バンチ）となって進行し、この電子バンチが周期的に発せられる。また、この際の電子エネルギーは調整可能である。

【0018】

この電子線 100 は、2 つの偏向電磁石 12 A、12 B によってその軌道が曲げられて図中の左右方向（一方向）に沿って後方（一方）から前方（他方）に向かうように、アンジュレータ 13 に、後方側から入射する。アンジュレータ 13 においては、軸方向（図中

10

20

30

40

50

左右方向)と垂直な磁場が、軸方向に沿って周期的に向きが逆転して形成されるように、複数の永久磁石、または電磁石が複数配列されている。これによって、アンジュレータ13内においては電子は後方(図中左側)から前方(図中右側)に向かって周期的に蛇行し、蛇行の際に電子線100における電子が発する光(放射光200A)が増強されて、電子線100と同じ向き(図中右側)に発せられる。放射光200Aを発した後の電子線100は、前方の偏向電磁石12Cによって放射光200Aの軌道から離れた後に、ビームダンプ14で吸収される。

#### 【0019】

また、アンジュレータ13内で発した放射光200Aを反射させて閉じ込めることによってレーザー発振をさせるための光共振器を構成するために、共振器ミラー(第1の共振器ミラー)15A、共振器ミラー(第2の共振器ミラー)15Bが、光の進行方向においてアンジュレータ13を含む領域の前後にそれぞれ設けられる。これによって、共振器ミラー15A・15B間に閉じ込められた放射光200Aとアンジュレータ13中で光(放射光200A)を発する電子との間で相互作用を発生させ、固体レーザーにおける場合と同様に光の誘導放出を起こすことにより、レーザー光(自由電子レーザー光)200を発振することができる。レーザー光200は、共振器ミラー15Aの中心部に設けられた小さな取り出し穴(図示せず)から前方に取り出される。レーザー光200の波長は、電子線100のエネルギー、アンジュレータ13における周期的磁場の強度、周期長に応じて定まる。上記の点については、従来より知られる自由電子レーザー装置と同様である。なお、共振器ミラー15Aに取り出し穴を設ける代わりに、共振器ミラー15Aを半透鏡としてよい。また、上記とは逆に共振器ミラー15B側からレーザー光200を取り出すこともできる。

#### 【0020】

この際、特許文献1、非特許文献1に記載されるように、電子線100がアンジュレータ13に入射する際の電子パンチの繰り返し周期と、光(放射光200A)が光共振器内(共振器ミラー15A、15B間)を通過する時間とを整合もしくは一致させることによって、レーザー光200を超短パルスレーザーとすることができる。ここで、これらを整合させるとは、光が光共振器内を通過する時間を、電子パンチの繰り返し周期の半分の整数倍、又は電子パンチの繰り返し周期の半分の整数分の一に一致させることを意味する。これらを一致させるとは、特許文献1に記載されるように、レーザー光200の1波長分の時間の1/100以下の精度でこれらを一致させることを意味する。

#### 【0021】

ここで、この自由電子レーザー装置10においては、レーザー光200とは別にレーザー光(シードレーザー光300)を発するシードレーザー光発振器20が用いられ、シードレーザー光300は、偏向ミラー21A、21Bを介し、共振器ミラー15Bにおいて設けられた小さな穴(図示せず)を通過し、電子線100及び共振器ミラー15A・15B間の放射光200Aの光路に入射する。なお、図1中の共振器ミラー15A・15B間において、電子線100、放射光200A、シードレーザー光300は便宜上ずれて記載されているが、実際にはこれらは同軸上に存在するように調整される。また、シードレーザー光300と、発振されるレーザー光200の波長は同一となるように調整される。シードレーザー光300は、シードレーザー光発振器20においてモード同期によって発振された超短パルスレーザー光であり、その位相(CEP)は、例えば特許文献2に記載の技術によって安定化・制御される。また、その発振周期は、電子線100における電子パンチの繰り返し周期と等しく設定される。

#### 【0022】

以下に、シードレーザー光300の作用について説明する。図2は、アンジュレータ13を電子線100が通過する際の、電子パンチと、放射光からなる光パルスの進行の状況を模式的に示す図である。ここでは、電子は後方(図中左方)から前方(図中右方)に向けて進行するものとする。まず、図2における最下段は、アンジュレータ13における電子線100の状況を示す。この軌道は、前記のように周期的な磁場によって蛇行する。電

10

20

30

40

50

子線 1 0 0 におけるパンチ長（電子パンチ B の空間的長さ）は、アンジュレータ 1 3 の全長よりも十分短いものとする、電子パンチ B は、その上側（図 2 の上から 2 段目）に示されるように、その長さ方向における電子電流（密度分布）を大きく変えることなく、アンジュレータ 1 3 中を後方（図中左側）から前方（図中右側）に向かって進行する。

【 0 0 2 3 】

光共振器内（共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間）を往復し最終的にはレーザー光 2 0 0 となる放射光 2 0 0 A は、電子パンチ B に含まれる個々の電子から発せられた放射光の重ね合わせとなる。このため、1 つの電子パンチ B がアンジュレータ 1 3 を通過する際に発せられる放射光 2 0 0 A は、電子パンチ B に対応してパルス状となった光パルス P として後方から前方に向けて発せられる。光パルス P の進行の状況は、図 2 において電子パンチ B の移動の状況の上（図 2 の最上段）に示されている。光パルス P は光速で後方から前方に直線的に進行する。自由電子レーザーにおいては、図 2 における光パルス P が共振器ミラー 1 5 A で反射された後に共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間を往復する際に、後続の電子パンチ B と同調することによって、誘導放出が生ずる。

【 0 0 2 4 】

ここで、電子パンチ B は、線形加速器 1 1 によって光速近くまで加速されているものの、その速度は光速よりも遅い。更に、アンジュレータ 1 3 においては、光パルス P は光速でアンジュレータ 1 3 中を後方から前方に直進するのに対し、電子軌道は複数の磁場によって蛇行しながら後方から前方に進行する。このため、アンジュレータ 1 3 中を電子パンチ B が進行するに際し、電子パンチ B は光パルス P から徐々に遅延し、アンジュレータ 1 3 中の全域にわたり様に光パルス P と電子パンチ B とを重複させることはできない。図 2 においては、電子パンチ B のアンジュレータ 1 3 における入射点（最後方）で電子パンチ B と光パルス P が重複しており、前方に向かってこれらの乖離が大きくなっている。電子パンチ B を形成する個々の電子は、光パルス P との相互作用に伴って誘導放出を行うので、誘導放出の強度は電子がアンジュレータを進むに従って大きくなる。電子パンチ B は光パルス P に対して徐々に遅延するため、誘導放出による光パルス P の増幅は、光パルス P の後方で顕著となる。従って、電子から見ると、光パルス P は後方にピークを持った波形となる。

【 0 0 2 5 】

この状況を確認するために、F E L シミュレーションコードを用いて、数値シミュレーションを行った結果を図 3 に示す。ここでは、特許文献 1 に記載のように、アンジュレータ 1 3 における電子（エネルギー 5 0 M e V ）の入射繰り返し周期と、光が光共振器内（共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間）を往復する周期とを完全に一致させた場合における波長 5  $\mu$  m のレーザー光 2 0 0 の強度（ピーク強度を 1 として規格化）を算出した結果が示されている。ここで、縦軸はリニア表示とされ、横軸は電子が後方から前方に向かって進行する際の前後方向における座標が波長単位で記載され、電子パンチ B の長さは 1 0 波長分となっている。この結果より、特許文献 1、非特許文献 1 に記載されるように、上記の方法で電子パンチ B よりも短い数波長分の時間間隔で光を発振する超短パルスレーザー光を発することができる。

【 0 0 2 6 】

図 4 は、図 3 の結果を縦軸を対数表示（ピークを 1 として規格化）した場合が示されており、前記の通り、電子パンチの誘導放出による増幅作用の結果、光パルスは後方にピークを持ち前方に向かって徐々に強度が減少する状況が示されている。ここで、横軸が 3 0 ~ 4 0 程度の領域における低強度の成分は、アンジュレータ 1 3 中で電子パンチ B が最も早く（アンジュレータ 1 3 への入射直後に）発した成分に対応し、これは、図 2 におけるアンジュレータ 1 3 における最も後方から発せられた成分に対応する。この成分においては、誘導放出の寄与はないために、その強度はピーク強度と比べて 6 桁以上低くなっている。

【 0 0 2 7 】

この成分は図 2 における最も後方にある光パルス P に対応し、光パルス P が共振器ミラ

10

20

30

40

50

ー 1 5 A ・ 1 5 B 間を往復して位相が固定されたレーザー光 2 0 0 が生成される際のシードとなる。前記の通り、この成分は電子が発した放射光であり、その位相は全く制御されずランダムであることが、レーザー光 2 0 0 の C E P が安定化しない原因となる。

#### 【 0 0 2 8 】

上記の自由電子レーザー装置 1 0 においては、シードレーザー光発振器 2 0 によって、シードレーザー光 3 0 0 が電子バンチ B と同期してアンジュレータ 1 3 に入射する設定とされる。ここで、シードレーザー光 3 0 0 が電子バンチ B と同期してアンジュレータ 1 3 に入射する状態とは、パルス状である電子バンチ B に対してパルス状であるシードレーザー光 3 0 0 が、少なくともアンジュレータ 1 3 における後方の部分（入射側）で重複し、この状況が周期的に繰り返される状態であることを意味する。この際の周期は、例えば電子バンチ B の繰り返し周期と等しくなる。ここで、シードレーザー光 3 0 0 は発振されるレーザー光 2 0 0 と同一の波長をもち、最終的にレーザー光 2 0 0 となる放射光 2 0 0 A に重畳され、特に電子バンチ B がアンジュレータ 1 3 に入射するタイミングとシードレーザー光 3 0 0 がアンジュレータ 1 3 に入射するタイミングを同期させた場合には、シードレーザー光 3 0 0 は、図 2 における最も後方の光パルス P に重畳される。前記の通り、図 2 における最も後方の光パルス P はレーザー光 2 0 0 を生成する際のシードとなる成分であるため、シードレーザー光 3 0 0 の強度を図 4 における横軸が 3 0 ~ 4 0 程度の低強度の成分よりも大きくした場合には、このシードレーザー光 3 0 0 がレーザー発振のシードとして支配的になる。

#### 【 0 0 2 9 】

このため、レーザー光 2 0 0 の位相（C E P）はシードレーザー光 3 0 0 の位相で定め、シードレーザー光 3 0 0 の位相が制御されていれば、結局、これによってレーザー光 2 0 0 の C E P を安定化することができる。この際、シードレーザー光発振器 2 0 におけるシードレーザー光 3 0 0 の位相制御を線形加速器 1 1 における電子線 1 0 0（バンチ B）の制御と同期させることにより、C E P を制御することが可能である。なお、シードレーザー光 3 0 0 の光強度は、図 4 における前方側の低強度の成分よりも大きい、図 4 におけるピーク強度よりも十分低くすることができるため、シードレーザー光発振器 2 0 としては、同一波長のレーザー光を発振するが自由電子レーザー装置 1 0 よりも大幅に低出力のものをを用いることができる。

#### 【 0 0 3 0 】

実際に、図 3 の結果を導出した場合と同様のパラメータで、シードレーザー光 3 0 0 を用いない場合と、シードレーザー光 3 0 0 を入射させた場合における放射光 2 0 0 A の共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間での往復回数と、これによって生成されたレーザー光 2 0 0 の発振毎の C E P をシミュレーションした結果を図 5 に示す。共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 往復時間（＝電子バンチ B の入射周期）は（1 0 0 ナノ秒）とした。各電子の発する放射光の位相はランダムとされ、シードレーザー光 3 0 0 の強度は 3 種類（（1） $1.3 \times 10^{-6}$ 、（2） $1.3 \times 10^{-8}$ 、（3）零（シードレーザー光使用せず）：単位は図 4 の縦軸に対応）とした。

#### 【 0 0 3 1 】

この結果より、シードレーザー光 3 0 0 を用いない場合には、前記の通り、C E P は徐々にシフトし、安定しないことが確認できる。これに対して、シードレーザー光 3 0 0 を用いた場合には、5 0 0 回程度で C E P は安定し、特にシードレーザー光 3 0 0 の強度が元の放射光 2 0 0 A の同一波長成分よりも十分に高い（2）の場合には、5 0 0 回以降の C E P の安定性も高い。

#### 【 0 0 3 2 】

このため、上記のシードレーザー光 3 0 0 を電子バンチ B と同期させてアンジュレータ 1 3 に入射させることによって、C E P が安定化された超短パルスのレーザー光（自由電子レーザー光）2 0 0 を得ることができる。

#### 【 0 0 3 3 】

なお、上記の自由電子レーザー装置 1 0 においては、シードレーザー光 3 0 0 の発振周



期は、電子線 1 0 0 における電子パンチの繰り返し周期と等しいものとした。ここでこれらの周期を一致させることは、前記と同様に、レーザー光 2 0 0 の 1 波長分の時間の 1 / 1 0 0 以下の精度でこれらを一致させることを意味する。ただし、アンジュレータ 1 3 への電子パンチ B とシードレーザー光 3 0 0 の入射タイミングを同期させることができる限りにおいて、これらの周期が一致する必要はない。電子パンチ B とシードレーザー光 3 0 0 の入射タイミングが同期するためには、電子パンチ B の繰り返し周期をシードレーザー光 3 0 0 の発振周期の整数倍、又は整数分の一と一致させればよい。

#### 【 0 0 3 4 】

また、上記の例では、シードレーザー光 3 0 0 は C E P が制御された超短パルス（モード同期）レーザー光であり、そのアンジュレータ 1 3 への入射タイミングが電子パンチ B の入射タイミングと同期する設定とされたが、シードレーザー光 3 0 0 を連続発振レーザーとすることもできる。ここで、シードレーザー光が連続発振レーザーであるとは、電子パンチ B の入射サイクルの多数回分に相当する十分長い時間間隔内において、シードレーザー光 3 0 0 が連続的に発振されている場合を意味する。この場合には、このシードレーザー光が光共振器（共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間）で定在波を形成できるように、共振器長（共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間隔）を、シードレーザー光の波長の半分の整数倍とすればよい。この場合には、シードレーザー光の位相と電子パンチ B との関係を上記と同様とすることができるため、同様に C E P を安定化することができる。

#### 【 0 0 3 5 】

前記のように、一般的に、自由電子レーザー装置における電子のエネルギー等を変えることによって放射光のスペクトルを調整し、発振される自由電子レーザー光の波長を調整することができる。この際、上記のように連続波であるシードレーザー光を用いる場合には、シードレーザー光の波長と自由電子レーザー光の波長とを等しくし、かつ共振器長をこの波長に整合させる必要がある。このため、上記の構成において、レーザー光 2 0 0 の波長が調整可能とされた場合には、共振器長（共振器ミラー 1 5 A ・ 1 5 B 間隔）は調整可能とすることが好ましい。

#### 【 0 0 3 6 】

また、上記の例では、シードレーザー光 3 0 0 の波長がレーザー光（自由電子レーザー光）2 0 0 と等しいものとされたが、シードレーザー光を、波長の異なる 2 つのレーザー光で構成することもできる。この場合には、これらの波長の逆数の差又は和を自由電子レーザー光の波長の逆数と等しくすれば、これらのレーザー光のビートを、実質的なシードレーザー光として用いることができる。こうした構成は、自由電子レーザー光の波長と等しい波長のレーザー光を必要な強度で発するレーザー光源が存在しない場合において、特に有効である。この場合、2 つのレーザー光が共に連続波であれば、上記のように共振器長を設定すれば、上記と同様に C E P が安定化された自由電子レーザー光を発振させることができる。

#### 【 0 0 3 7 】

また、上記の例では、線形加速器（加速器）1 1 によって高エネルギー化された電子で構成される電子パンチがアンジュレータ 1 3 で放射光 2 0 0 A を発する設定とされたが、電子の代わりに陽電子を用いてもよい。また、電子パンチを繰り返しアンジュレータ 1 3 に入射させることができる限りにおいて、使用される加速器として、様々なものを用いることができる。

#### 【 符号の説明 】

#### 【 0 0 3 8 】

- 1 0 自由電子レーザー装置
- 1 1 線形加速器（加速器）
- 1 2 A、1 2 B、1 2 C 偏向電磁石
- 1 3 アンジュレータ
- 1 4 ビームダンプ
- 1 5 A 共振器ミラー（第 1 の共振器ミラー）

10

20

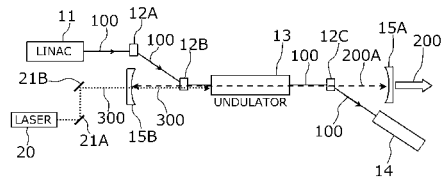
30

40

50

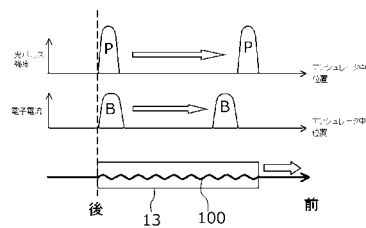
1 5 B 共振器ミラー（第 2 の共振器ミラー）  
 2 0 シードレーザー光発振器  
 2 1 A、2 1 B 偏向ミラー  
 1 0 0 電子線  
 2 0 0 レーザー光（自由電子レーザー光）  
 2 0 0 A 放射光  
 3 0 0 シードレーザー光  
 B 電子パンチ  
 P 光パルス

【図 1】

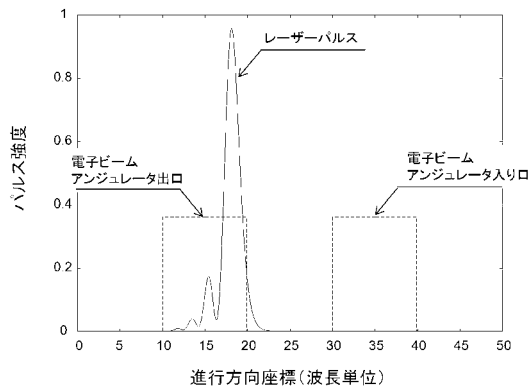


10

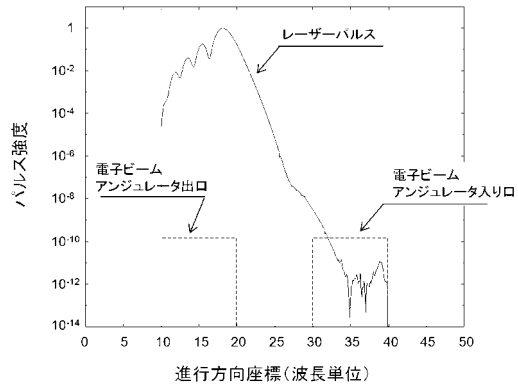
【図 2】



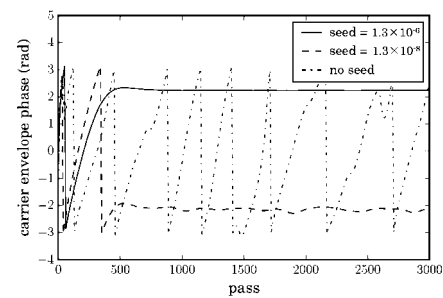
【図 3】



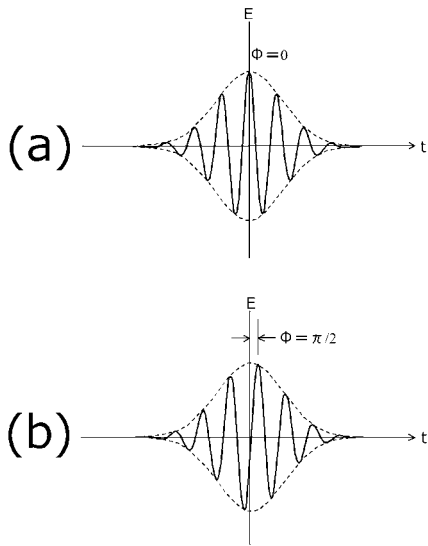
【図 4】



【図 5】



【 図 6 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 永井 良治

茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内

F ターム(参考) 2G085 AA03 CA24 DA04 DB08

5F172 AG01 DD04 EE23